

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420476

研究課題名(和文) 寒冷地における埋設管のリスク評価

研究課題名(英文) Damage risk assessment of buried pipes in cold regions

研究代表者

川口 貴之 (KAWAGUCHI, Takayuki)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20310964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、寒冷地における埋設管の損傷リスクを評価するため、舗装路下にある水道管周辺の詳細な温度分布や常時の土中土圧、更には車両通過に伴う地盤内増加応力の季節変化を計測した。その結果、これらが地盤の凍結融解で大きく変化することを明らかにした。また、車体重量が大きくなると地盤内増加応力も増大するが、その比率も凍結融解に伴って変化することや、地盤内での荷重分散についても凍結融解に伴って変化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)： This study measured detailed temperature distribution around buried pipes under the pavement and vertical stresses in the ground, as well as seasonal changes of incremental stress exerted by vehicle wheel loads for damage risk assessment of buried pipes beneath pavements in cold regions.

Results revealed that these measured values change significantly as a result of the ground's freeze-thaw process. In addition, we found that the incremental stress in the ground increases with the vehicle weight and that the rate of increase changes with freezing and thawing. The stress distribution (transmission) in the ground was also found to change with freezing and thawing.

研究分野：地盤工学

キーワード：寒冷地 凍結 凍上 埋設管 地中応力 輪荷重

### 1. 研究開始当初の背景

北海道のような寒冷地では、地盤や土構造物が凍結・融解することに伴い、路面の亀裂や擁壁の変状など、様々な地盤工学的問題が生じるため、申請者も凍結・融解に伴う土の物性変化や耐凍上性を有する補強土壁の開発などに精力的に取り組んでいる。

このような諸問題の中には、水道やガスといった埋設管の凍上被害もあり、これを防ぐ目的で各管の埋設深は基本的に最大凍結深よりも大きい。しかしながら、北海道北見市では2007年1月に土中埋設されたガス導管が破損し、CO中毒によって3名の死者と11名の負傷者を出す事故が起きている。また、事故後の点検でも周辺地域の埋設管で数多くの亀裂や継手のゆるみが確認された。調査報告書によれば、事故の原因として、地盤の凍結が車両荷重による地盤の不同沈下を加速させたこと、地盤の凍結で除排雪作業の際の振動や荷重が大きくなったこと、不均質に凍結が進行したことで地盤内応力が増加したことなどが挙げられているが、現時点までに埋設管を損傷に導いた原因に関する仮説を検証した例は見当たらない。また、道路盛土内が凍結した際、埋設管に作用する土圧は周辺地盤の凍結膨張によって単純に増加するのか、不均一性などによって局所的には減少もありえるのか、といった基本的なことさえ、現時点で明らかになっていると言える状況にはない。

一方、高度経済成長期に集中的に整備された各種埋設管は一斉に老朽化が進んでいるだけでなく、大震災に対応するために耐震化もせねばならず、計画的な改良と更新が全国的に急務となっている。また、最近の管路等に係る技術水準の向上やこの事態を見越して、公共事業コスト縮減のための規制緩和として、いわゆる「浅層化通達」が発せられており、現在では車道・歩道下で各管の埋設深を最小で0.6mにすることもできる。当然、寒冷地でも埋設管の更新作業が現在進められているが、少雪寒冷な地域では管径を考慮すると更新作業時の掘削深が1.5mを超える場合が多い。労働安全衛生法では掘削深1.5mを超えると原則として土留工を施すことになっており、これによって施工コストが大幅に膨れ上がるため、限られた財政で行う寒冷地の埋設管更新作業は大幅に遅れることになる。なお、この埋設深は一般に各自治体が他の構造物設計で用いる凍結深を参考に経験的に決めているにすぎず、合理的な設計法の提案が望まれている。

以上の背景から、まずは寒冷地に敷設された埋設管の周辺温度と作用する土圧、車両荷重の影響を詳細に把握することが急務だと考え、先行研究として北見市上下水道局に協力を依頼し、交通量の多い市内中心部の水道用埋設管で計測を試みた。その結果、埋設管に対して局所的に深刻なダメージを与える可能性は十分にあると考えられるが、一つの

調査地点から得られる情報には限界があり、条件の異なる多くの調査地点での計測や理想的な模擬道路地盤内での計測が必要だとの考えに至った。

### 2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では路面環境や気候条件、地形地質を含む設置環境、その不均一性も踏まえた寒冷地における埋設管のリスクを正確に把握するため、既存とは埋設管の設置環境・条件が異なる複数の調査地点を新たに設け、各地点で地温や土圧、車両荷重の影響、更にはその不均一性を計測することを第一の目的とした。また、より多くの計測機器が埋設された理想的な模擬道路地盤も大学構内に構築し、学内外の全調査地点で凍結域や地盤構造の不均一性を評価するための原位置表面波探査、周辺土の凍上試験などの室内試験も実施することにした。更には、これらの結果等から得られる地盤パラメータを使って凍結深や気候・埋設条件によるリスクの増減を推定するための熱・応力解析も実施し、最終的には周辺地盤の凍結によって埋設管にはどの程度の負荷が作用しうるのか、その大きさは設置環境によってどの程度変化するかについて明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 調査地の概要

**写真1**は本研究で設けた5か所の調査地点の様子と概略的な道路断面図を示したものである。地点A~Cは北海道北見市内の車道であり、地点Aは比較的交通量の多い市街地、地点Bは閑静な住宅街、地点Cは交通量が少ない郊外の道路である。また、地点Dは本研究のために北見工業大学構内にある屋外土槽に設けた模擬舗装路、地点Eは住宅街にある歩道である。なお、土槽の底部は地山の上に碎石層を設け、吸出し防止のために不織布を敷設している。

#### (2) 設置した計測機器の概要

**写真2**は計測機器を設置した埋設管(水道管)周辺の様子を示したものである。埋設管周辺に温度測定ロッドと、土圧計ならびに土壌水分センサーを設置し、これらを近傍に設けた計測ボックス内の各種集録装置と接続した。計測は基本的に毎時1回ずつ行っている。温度測定ロッドについては、0.1m間隔に穴が開けられた1~2m程度の塩化ビニルパイプにT型熱電対を通し、先端を穴から出して固定し、砂を充填したものであり、埋設管周辺に複数本のロッドを配置することで周辺の温度分布を把握できるようにしている。

土圧計については、容量200 kN/m<sup>2</sup>のロードセル型土圧計であり、埋設深は表-1中に示したとおりである。また、地点A, B, Cについては、土圧計を概ね通過する車両の片車輪直下となる位置とした。また、毎時1回計測している常時の鉛直土圧については、計測ボ

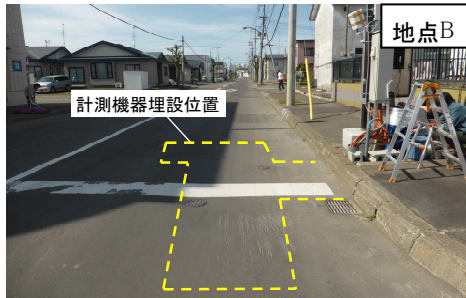


写真-1 調査地点の様子

ックス内に設置したデータロガーで集録しているが、車両通過に伴う鉛直増加応力を計測するには土圧計を高速サンプリング可能なセンサインタフェースで集録した。

周辺地盤の水分量の変化を把握することを目的とした土壌水分センサーについては、誘電率型のセンサーであり、全ての調査地点で同深度となるよう土圧計近傍に設置した。

さらに、2016年度からは車体重量が大きく異なる2種類の車両を通過させ、その際に生じる地盤内鉛直増加応力の違いやその変化についても計測した。また、舗装路を模擬し

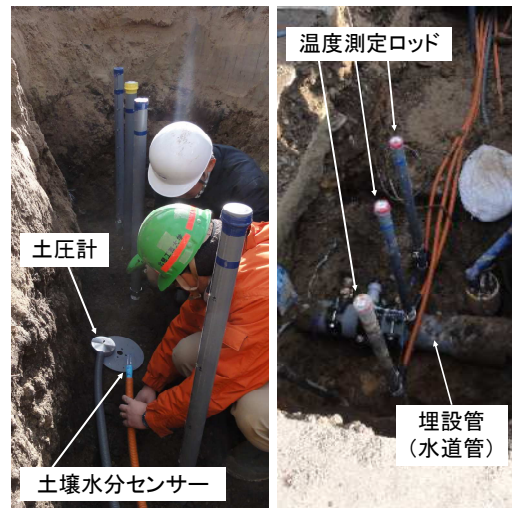


写真2 埋設管周辺の様子

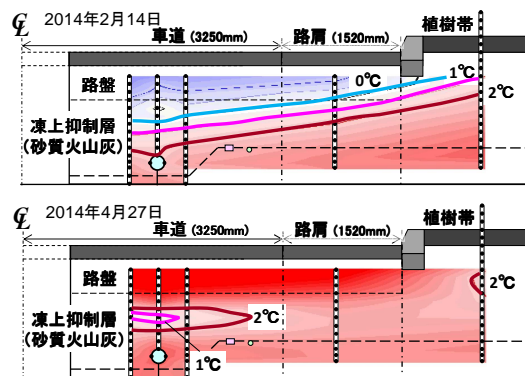


図1 埋設管周辺温度の例

た屋外土槽上で載荷位置を変化させた際の地盤内鉛直増加応力の分散やその変化についても計測した。

#### 4. 研究成果

図1は例として市街地にある計測領域内の温度コンター図であり、厳冬期と融雪期の様子を示している。領域内の温度は地盤内をメッシュ状に分割し、近傍の温度測定ロッドによる計測値を比例配分することで算出している。また、図中には計算結果を用いた等温線も示している。車道下にある埋設管上方の凍結深さは大きいですが、拡幅除雪によって寄せられた雪の断熱効果や、管内の水温の影響によって、路肩の凍結深は極めて小さく、道路横断方向に急な温度勾配ができることが分かった。また、地盤が融解する際にも同様な影響によって1~2°Cの低温領域が複雑な分布形状となっていることが分かった。

図2は例として市街地にある計測値における4シーズンにわたる各種計測結果をまとめたものである。図中の凍結深さは、土圧計近傍に設置された多点の温度センサーでの計測結果を比例配分することで算出した0°Cの位置であり、各シーズンの最大凍結深は凍結指数に応じて変化していた。

水分計については、浅い位置では周辺地盤の凍結によって大きく低下し、融解とともに

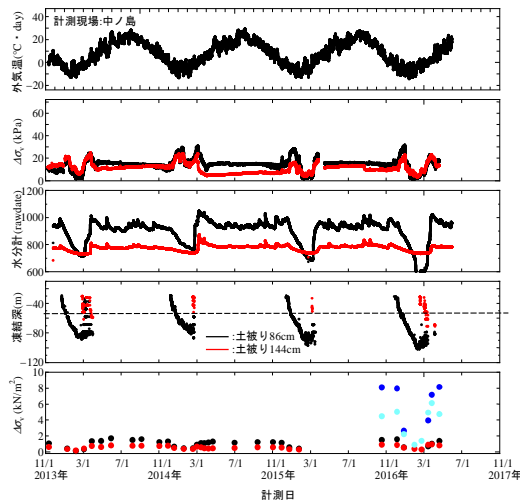


図2 計測結果のまとめ

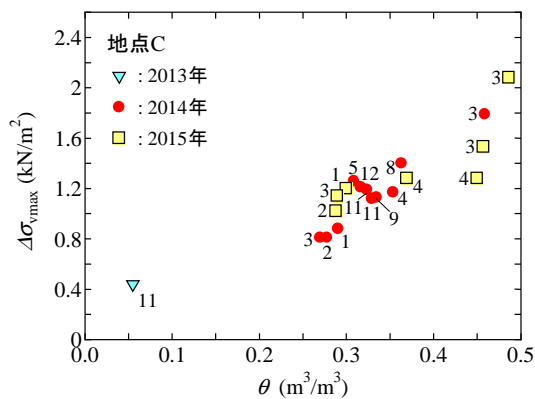


図3 地盤内増加応力と体積含水率の関係

急上昇することが分かった。

土圧計から計測された地盤内鉛直応力 $\sigma_v$ については、ここを含めたいずれの地点においても、凍結期間に $\sigma_v$ が大きく増減し、未凍結期の2~3倍にまでなりうるということが分かった。ただし、 $\sigma_v$ の変化傾向については、地点によって多少異なっていたが、 $\sigma_v$ の上昇は凍結や凍上による土の膨張に伴って周辺地盤から受ける反力によるものだと考えられることから、この違いは主に凍結領域に存在する土の凍上性によるものだと推察される。しかし、融解期に再び上昇する理由など、不明な点も多く、これについては今後も継続的に検討していきたいと考えている。

車両通過に伴う $\Delta\sigma_v$ については、乗用車、ホイールローダーの試験結果とともに、凍結期間に低下することが分かった。これについては、多層弾性解析プログラムGAMESでも凍結域の弾性係数を上昇させることで概ね表現可能であることが分かった。しかし、他地点ではあまり減少しないことも確認されており、これについては境界条件の違いが大きく影響していると考えられ、今後FEM解析などを行うことで検討していきたいと考えている。一方、いずれの計測地点においても、融解期(春)に $\Delta\sigma$ が大きくなる傾向については共通であった。

図3は $\Delta\sigma_v$ と土壌水分センサーから得られ

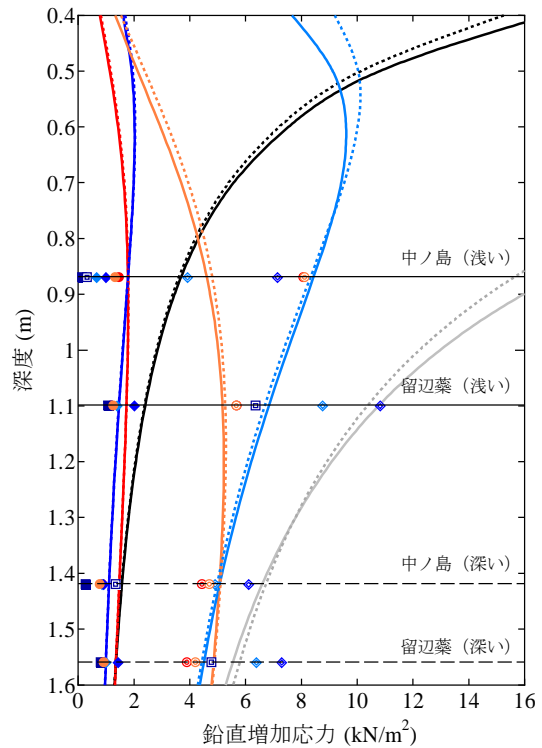


図4 増加応力の計測結果と弾性理論解との比較

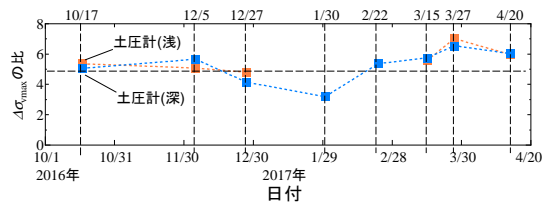


図5 輪荷重の違いによる地盤内応力比の変化

た体積含水率 $\theta$ の関係をプロットしたものである。両者には概ね正の相関があることから、融解期(春)における $\Delta\sigma$ 上昇が融雪等に伴う周辺地盤の水分上昇によって生じた剛性の低下やポアソン比の増加などが主な要因だと考えられる。

図4は2種類の車両の通行から得られた代表的な $\Delta\sigma$ と Boussinesq の弾性理論解を用いた計算結果を比較したものである。地点によっては、融雪期に実施したホイールローダーによる $\Delta\sigma_v$ が弾性理論解を超えており、特に深い位置で顕著であることが分かった。

図5は2種類の車両(乗用車、ホイールローダー)から得られた $\Delta\sigma_v$ の比の変化を示したものである。凍結から融解する時期においていずれの地点でも変動しており、この地点では凍結期に比が低下していたが、いずれの地点でも融解期に比が最大となっていた。また、地盤を半無限弾性体と仮定する弾性理論や解析では、この変化を表現できないため、これについては今後FEM解析等を用いて検討していきたいと考えている。

いずれにしても、融解期(春)には $\Delta\sigma_v$ が大きくなり、それは重車両ほど顕著になることが明らかとなった。また、寒冷地で既設の水道管やガス管が埋設されていることが多い

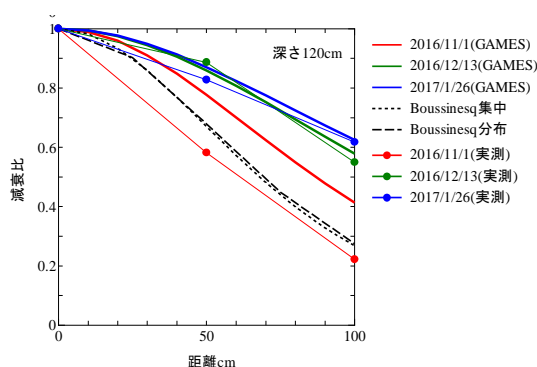


図6 荷重位置の変化に伴う低減率の比較

1.5m程度の深さで Boussinesq の弾性理論解を超えうることにも明らかとなった。これらの知見は寒冷地の埋設管を考える上で極めて重要だと考えられる。

図6は荷重位置が土圧計直上から離れたことに伴う $\Delta\sigma_v$ の低減率を比較したものである。図中では、土圧計直上での荷重試験から得られた $\Delta\sigma_v$ を1としており、凍結深さが異なる幾つかの計測結果を比較している。凍結の有無によって低減傾向が大きく異なっており、凍結することで荷重位置が離れたことに伴う低減率は小さくなるのが分かる。図中には、Boussinesqの弾性理論解や多層弾性解析プログラム GAMES による計算結果(破線, 点線)も示している。Boussinesqの弾性理論解については未凍結期の試験結果を比較的よく表現しているが、当然凍結による比の変化を表現できない。また、多層弾性解析を用いれば、ある程度の変化を表現でき、この変化が凍結に伴う剛性変化によるものであることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ①岸川 鉄啓, Dagvadorj Otgonjargal, 鈴木 信太朗, 川口 貴之, 中村 大, 山下 聡, 凍結融解が地盤内応力伝播に与える影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 査読無, Vol. 57, 2017, pp. 27-34, <http://jgs-hokkaido.org/pastweb/tech-rep-pdf/index.html>
- ②川俣 さくら, 川口 貴之, 中村 大, 倉知 禎直, 林 啓二, 川尻 峻三, 山下 聡, 透水性断熱材を用いたギャビオン補強土壁の積雪寒冷環境における性能評価, ジオシンセティックス論文集, 査読有, Vol. 31, 2016, pp. 119-126, DOI:10.5030/jcigsjournal.31.119
- ③鈴木 信太朗, 川口 貴之, 中村 大, 川尻 峻三, 山下 聡, 内島 典子, 寒冷地の道路内における鉛直土圧の季節変化, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol. 71, No. 2,

2015, pp. I\_475-I\_484,  
DOI:10.2208/jscejam.71.I\_475

- ④鈴木 信太朗, 川口 貴之, 中村 大, 畑中 将志, 山下 聡, 市街地に埋設された水道管周辺の温度と土中土圧の季節変動, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 査読無, Vol. 54, 2014, pp. 77-86, <http://jgs-hokkaido.org/pastweb/tech-rep-pdf/index.html>

[学会発表] (計6件)

- ①岸川 鉄啓, Dagvadorj Otgonjargal, 鈴木 信太朗, 川口 貴之, 中村 大, 山下 聡, 凍結融解が地盤内応力伝播に与える影響, 第57回地盤工学会北海道支部技術報告会, 北見工業大学(北海道・北見市), 2017年2月3日
- ②鈴木 信太朗, 川口 貴之, 中村 大, 川尻 峻三, 山下 聡, 寒冷地における水道管周辺地盤の温度分布と鉛直土圧, 第70回土木学会年次学術講演会, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市), 2015年9月16日
- ③鈴木 信太朗, 川口 貴之, 中村 大, 川尻 峻三, 山下 聡, 内島 典子, 寒冷地の道路内における鉛直土圧の季節変化, 第18回応用力学シンポジウム, 金沢大学角間キャンパス(石川県・金沢市), 2015年5月17日
- ④鈴木 信太朗, 川口 貴之, 中村 大, 山下 聡, 寒冷地における水道管周辺地盤の温度と土中土圧～北見市市街地の例, 第49回地盤工学会研究発表会, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市), 2014年7月15日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川口 貴之 (KAWAGUCHI, Takayuki)  
北見工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 20310964

### (2) 研究分担者

所 哲也 (TOKORO, Tetsuya)  
苫小牧工業高等専門学校・その他部局等・准教授  
研究者番号: 40610457

### (3) 研究分担者

石川 達也 (ISHIKAWA, Tatsuya)  
北海道大学・工学研究院・教授  
研究者番号: 60359479

### (4) 研究分担者

中村 大 (NAKAMURA, Dai)  
北見工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 90301978